

УДК 621.73

Кухарь В.В. к.т.н., доц.

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина

## МАКРОПОКАЗАТЕЛИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И РАБОТА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОСАДКЕ ЗАГОТОВОК ВЫПУКЛЫМИ ПЛИТАМИ

Kukhar V.

The State High Educational Institution «Priazovskiy State Technical University», Mariupol, Ukraine ([www.pstu.edu](http://www.pstu.edu))

### MACROINDEXES OF FORMCHANGING AND WORK OF DEFORMATION DURING UPSETTING OF BILLETS BY CONVEX PLATES

*Предложены относительные критерии (макропоказатели) в виде безразмерных величин для оценки геометрического формоизменения заготовок при предварительном профилировании выпуклыми продолговатыми плитами под последующую объемную штамповку или ковку. Получил дальнейшее развитие метод определения работы деформации при объемном формоизменении. Установлена функциональная связь макропоказателей формоизменения в продольном, поперечном и высотном направлениях с удельной работой деформации на примере профилирующей горячей осадки выпуклыми продолговатыми плитами медных заготовок. При этом получены регрессионные зависимости предложенных макропоказателей от геометрических и технологических факторов. Проанализировано изменение величины удельной работы деформации на протяжении профилирующей осадки плитами с различным радиусом закругления.*

*Ключевые слова:* профилирование, осадка выпуклыми продолговатыми плитами, макропоказатели формоизменения, работа деформации, функциональная взаимосвязь

#### Введение

Осадку заготовок выпуклыми плитами применяют в технологияхковки и объемной штамповки на предварительных переходах для улучшения проработки внутренних слоев литого металла, сокращения концевой обрезки [1, 2] и приближения формы заготовки к конфигурации штампованной поковки [3]. Известно использование выпуклых продолговатых (цилиндрических), сферических и конических плит, при этом процессы осадки выпуклым продолговатым инструментом являются наименее изученными.

Для количественной оценки формоизменения заготовок в продольном, поперечном и высотном направлении при осадке выпуклыми продолговатыми плитами предложены макропоказатели (критерии  $Y$ ) в виде соотношений характерных линейных размеров [4]. Квадрат отношения линейных размеров (в ряде случаев – площадей поперечного сечения заготовки до и после деформации) имеет пропорциональную связь с величиной работы, затрачиваемой на осуществление пластического формоизменения [5]. Вид данной функциональной связи подлежит определению, при этом следует учитывать свойства материала при заданном термомеханическом режиме деформирования и индивидуальность закономерностей развития принятых макропоказателей неравномерности деформации в процессе осадки инструментом с необходимым радиусом закругления.

#### Цель

Целью данных исследований является определение работы деформации при осадке выпуклыми продолговатыми плитами и установление её функциональной связи с относительными макропоказателями, характеризующими формоизменение заготовки.

#### Исследование

Процесс осадки выпуклыми продолговатыми плитами сопровождается вытяжкой заготовки в направлении, перпендикулярном горизонтальной оси инструмента, и формированием бокового профиля с различной формой бочкообразности, конфигурация которой зависит от отношения исходной высоты ( $H_0$ ) к диаметру ( $D_0$ ) заготовки и соотношения радиуса ( $R$ ) выпуклости осадочных плит и диаметра заготовки. При относительной высоте заготовки  $H_0/D_0 \cong 1,0$  боковой профиль близок к одинарной бочке, при  $H_0/D_0 \cong 2,0$  – к двойной. Кроме того, внедрение в торцы заготовки радиусных бойков приводит к высотной неравномерности деформации (рис. 1). Последнее обстоятельство затрудняет определение величины степени деформации по значениям габаритных размеров заготовки до и после осадки.

Степень деформации ( $\epsilon$ ) находили как отношение смещенного в вертикальном направлении объема ( $V_{см}$ ) к объему заготовки ( $V_{заг}$ ). На основании рассмотрения трехмерной задачи была выведена функциональная

зависимость степени деформации  $\varepsilon$  от величины обжатия, начальных размеров заготовки и радиуса осадочных плит [6]. В результате проведения вычислительных экспериментов в пакете Mathcad с использованием данной функции [6] расчетно-аналитическим путем было получено обобщенное выражение для определения степени деформации ( $\varepsilon$ , %) в зависимости от отношений  $H_0/D_0$  и  $R/D_0$ :

$$\varepsilon = a \cdot \varepsilon^* - b, \quad (1)$$

где  $\varepsilon^* = [(H_0 - h_{к.ср})/H_0] \cdot 100\%$ , причем  $h_{к.ср} = (H + h)/2$ , здесь  $H$  и  $h$  – максимальная и минимальная высота заготовки, которая подвергалась осадке выпуклыми плитами соответственно (см. рис. 1);

$$a = [0,019 - 0,037(H_0/D_0)](R/D_0) - 0,069(H_0/D_0) + 1,387;$$

$$b = [1,293 - 0,65(H_0/D_0)](R/D_0) - 0,43(H_0/D_0) + 0,993.$$

Выражение (1) характеризуется коэффициентом детерминации  $R_a^2 = 0,911$  и справедливо при относительных высотах  $H_0/D_0 = 1,0 \div 2,0$  и соотношениях  $R/D_0 = 0,5 \div 2,5$ .

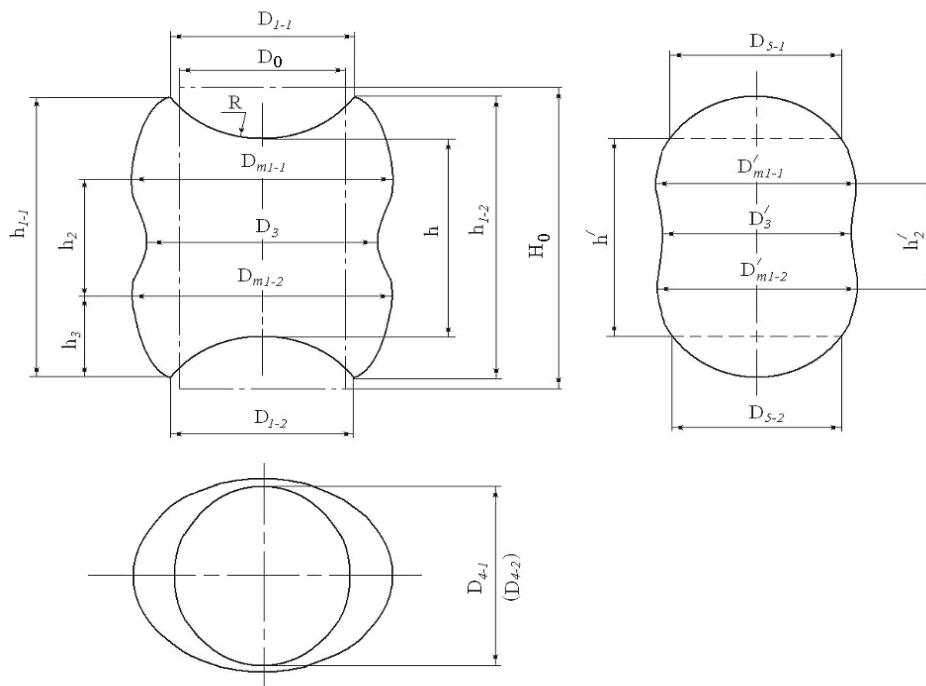


Рис. 1. Схема осадки заготовок выпуклыми продолговатыми плитами:

$D_{1-1}$ ,  $D_{1-2}$ ,  $D_{m1-1}$ ,  $D_{m1-2}$ ,  $D_3$ ,  $D'_3$ ,  $h$ ,  $h'$ ,  $h_{1-1}$ ,  $h_{1-2}$ ,  $h_2$ ,  $h'_2$ ,  $h_3$ ,  $h'_3$ ,  $D'_{m1-1}$ ,  $D'_{m1-2}$ ,  $D_{4-1}$ ,  $D_{4-2}$  – контролируемые размеры

Изучали поведение макропоказателей, приведенных в табл. 1. Соответственно критерии  $Y_1$  и  $Y_6$  характеризуют формоизменение поперек горизонтальной оси цилиндрических осадочных плит, критерий  $Y_2$  отвечает за различие формоизменения в продольном и поперечном направлениях, а критерий  $Y_3$  – показывает величину неравномерности деформации в высотном направлении.

Таблица 1

Обозначения для макропоказателей неравномерности деформации

Макропоказатель	$D_3/D_0$	$D_3/D'_3$	$(h_1 - h)/H_0$	$D_m/D_1$
Принимаемое обозначение	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_6$

Для получения математических зависимостей принятых макропоказателей формоизменения от влияющих факторов проводили совмещение вычислительных экспериментов в среде конечно-элементного анализа ABAQUS 6.5 с методикой планирования эксперимента, которая предполагает наличие параллельных опытов с проверкой гипотезы однородности дисперсий  $S^2$  [7]. Для обеспечения возможности обработки результатов численного эксперимента вводили малую искусственную дисперсию  $S^2 = 0,0001$  (исходя из предположения проведения двух параллельных опытов) и задавали уровень надежности  $\alpha = 0,95$ . При условии симметричного обжатия (см. рис. 1):  $D_{1-1} = D_{1-2} = D_1$ ;  $D_{m1-1} = D_{m1-2} = D_m$ ;  $h_{1-1} = h_{1-2} = h_1$ ;  $D'_{m1-1} = D'_{m1-2} = D'_m$  и т.п.

Исследовали горячую осадку медных (марка М1) заготовок исходя из необходимости разработки технологии горячей объемной штамповки медных водоохлаждаемых пластин. В результате обработки данных справочника [8] методами матричного анализа была получена зависимость ( $R_a^2 = 0,8804$ ) сопротивления

деформации ( $\sigma_{s,M1}$ ) от степени деформации, скорости деформации ( $\xi = 0,4 \div 50 \text{ с}^{-1}$ ) и температуры ( $t = 20 \div 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ), что необходимо для задания условий моделирования:

$$\sigma_{s,M1} = (A_1 \cdot t + A_2) \cdot \varepsilon^2 + (B_1 \cdot t + B_2) \cdot \varepsilon + (C_1 \cdot t + C_2), \quad (2)$$

где  $A_1 = -0,004 \cdot \xi^2 + 0,0849 \cdot \xi - 0,1953$ ,  $A_2 = 3,4005 \cdot \xi^2 - 73,978 \cdot \xi + 116,96$ ;

$$B_1 = 0,0019 \cdot \xi^2 - 0,038 \cdot \xi - 0,1041, \quad B_2 = -1,6527 \cdot \xi^2 + 35,679 \cdot \xi + 180,16;$$

$$C_1 = -0,0001 \cdot \xi^2 + 0,0025 \cdot \xi - 0,0979, \quad C_2 = 0,1159 \cdot \xi^2 - 1,6404 \cdot \xi + 103,3.$$

Постановочное моделирование процесса осадки выпуклыми плитами показало, что изменение коэффициента контактного трения в пределах  $\mu = 0,1 \div 0,5$  влияет на значения искомых относительных макропоказателей в четвертом знаке после запятой, что дает основание не рассматривать  $\mu$  как влияющий фактор. Таким образом, расчеты выполняли согласно матрице полного факторного эксперимента  $2^5$ . В таблице 2 приведены значения влияющих факторов, при которых проводили численное моделирование формоизменения.

Таблица 2

**Условия проведения численного эксперимента при моделировании осадки выпуклыми продолговатыми плитами медных (M1) заготовок**

Факторы (обозначение)	$H_0/D_0$ (x1)	$R/D_0$ (x2)	$\varepsilon$ , отн. ед. (x3)	$\frac{t(^{\circ}\text{C})}{1000(^{\circ}\text{C})}$ (x4)	$\xi$ , $\text{с}^{-1}$ (x5)
Основной уровень	1,5	1,5	0,3	0,46	15,2
Интервал варьирования	0,5	1,0	0,2	0,44	14,8
Верхний уровень	2,0	2,5	0,5	0,9	30
Нижний уровень	1,0	0,5	0,1	0,02	0,4

После получения уравнений регрессии в кодированном виде переход от кодированных к натуральным значениям влияющих факторов, в соответствии с табл. 2, следует осуществлять с использованием выражений:

$$X_1 = \frac{H_0/D_0 - 1,5}{0,5}; \quad X_2 = \frac{R/D_0 - 1,5}{1,0}; \quad X_3 = \frac{\varepsilon - 0,3}{0,2}; \quad X_4 = \frac{t/1000 - 0,46}{0,44}; \quad X_5 = \frac{\xi - 15,2}{14,8}. \quad (3)$$

Табличное [7] значение критерия Кохрена для моделирования формоизменения  $G_{\text{табл}}(M1) = 0,6602$ . Дисперсии считают однородными, когда расчетное значение  $G_p < G_{\text{табл}}$ . При постоянном значении внесенной дисперсии  $S^2 = S_{\text{max}}^2 = 0,0001$  расчетные значения  $G_p(M1) = 0,03125 < G_{\text{табл}}(M1)$ , следовательно, внесенные дисперсии однородны. Критические значения критериев Фишера для оценки адекватности регрессионной модели [7]:  $F_{\text{кр}}(M1) = 3,3$ . В случае, когда расчетный критерий Фишера  $F$  меньше критического, т.е.  $F < F_{\text{кр}}$ , модель является адекватной. Установлено, что максимальное значение  $F = 2,7096$  отвечает макропоказателю  $Y_1$ , следовательно, полученные регрессионные модели адекватны. После оценки значимости каждого коэффициента уравнений регрессии по  $t$ -критерию Стьюдента ( $t_{\alpha, f}(M1) = 2,04$  [7]) можем записать:

$$Y_1 = 1,2106 + 0,0042 \cdot X_1 + 0,0352 \cdot X_2 + 0,1696 \cdot X_3 + 0,0081 \cdot X_1 X_3 + 0,0209 \cdot X_2 X_3; \quad (4)$$

$$Y_2 = 1,048 - 0,0140 \cdot X_1 - 0,0188 \cdot X_2 + 0,0345 \cdot X_3 - 0,0065 \cdot X_1 X_3 - 0,0170 \cdot X_2 X_3; \quad (5)$$

$$Y_3 = 0,4012 - 0,058 \cdot X_1 - 0,2901 \cdot X_2 + 0,2108 \cdot X_3 + 0,006 \cdot X_1 X_2 + 0,001 \cdot X_1 X_3 - 0,179 \cdot X_2 X_3 - 0,014 \cdot X_1 X_2 X_3; \quad (6)$$

$$Y_6 = 1,0871 + 0,0154 \cdot X_1 - 0,0119 \cdot X_2 + 0,0536 \cdot X_3 + 0,0133 \cdot X_1 X_3 - 0,0269 \cdot X_2 X_3 - 0,0057 \cdot X_3 X_4 + 0,004 \cdot X_3 X_5 + 0,0043 \cdot X_2 X_3 X_4. \quad (7)$$

Современные подходы к оценке энергосиловых режимов профилирования заготовок основаны на расчете полной ( $A$ ) и удельной ( $A_y$ ) работы деформации, приходящейся на единицу объема заготовки:

$$A = V_{\text{заг}} \cdot p_{\text{ср}} \cdot \varepsilon \quad \text{и} \quad A_y = p_{\text{ср}} \cdot \varepsilon, \quad (8)$$

где  $p_{\text{ср}}$  – среднее давление за путь деформирования до степени деформации  $\varepsilon$ , определяемое по выражению:

$$p_{\text{ср}} = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} p(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\varepsilon} \eta_{\sigma}(\varepsilon) \sigma_s(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (9)$$

здесь  $p(\varepsilon)$  и  $\eta_{\sigma}(\varepsilon) = \eta_{\sigma}(\varepsilon; H_0/D_0; R/D_0)$  – функции изменения давления и приведенного давления соответственно в процессе осадки выпуклыми продолговатыми плитами;  $\sigma_s(\varepsilon) = \sigma_s(\varepsilon; t; \xi)$  – зависимость сопротивления деформации материала от условий деформирования, которая для случая осадки медных заготовок аппроксимирована выражением (2), т.е.  $\sigma_s(\varepsilon) = \sigma_{s,M1}(\varepsilon; t; \xi)$ .

Выражение (9) можно представить как произведение среднеинтегральных величин:  $p_{cp} = \eta_{\sigma, cp} \cdot \sigma_{s, M1, cp}$ . Приведенное давление является характеристикой процесса деформации, в данном случае – осадки выпуклыми продолговатыми плитами, не зависящей от свойств материала заготовки. По результатам обработки результатов экспериментальных исследований получена эмпирическая функция ( $R_a^2 = 0,8911$ ) изменения приведенного давления от степени деформации осадки ( $\epsilon$ ), радиусности ( $R/D_0$ ) осадочных плит и отношения высоты к диаметру заготовки ( $m = H_0/D_0$ ), которая имеет вид:

$$\eta_{\sigma} = A' \epsilon^2 + B' \epsilon + C', \quad (10)$$

где  $A' = (-4,6165 \cdot m + 7,1799) \cdot (R/D_0)^2 + (13,289 \cdot m - 16,747) \cdot (R/D_0) + (0,4693 \cdot m - 1,8221)$ ;

$$B' = (2,0966 \cdot m - 3,9114) \cdot (R/D_0)^2 + (-6,4276 \cdot m + 10,689) \cdot (R/D_0) + (0,0366 \cdot m + 0,6691);$$

$$C' = (-0,0519 \cdot m + 0,4489) \cdot (R/D_0) + (0,5342 \cdot m - 0,2704).$$

Следовательно, среднее значение приведенного давления ( $\eta_{\sigma, cp}$ ) за путь деформирования до степени деформации  $\epsilon$  вычисляют по формуле:

$$\eta_{\sigma, cp} = \frac{1}{\epsilon} \int_0^{\epsilon} (A' \epsilon^2 + B' \epsilon + C') d\epsilon = \left[ \frac{A'}{3} \epsilon^2 + \frac{B'}{2} \epsilon + C' \right]. \quad (11)$$

Графические зависимости  $\eta_{\sigma, cp}(\epsilon; R/D_0)$  для  $H_0/D_0 = 1,0$  и  $H_0/D_0 = 2,0$  показаны на рис. 2. Отметим, что при деформировании более высоких заготовок наблюдаются большие значения среднего приведенного давления, причем увеличение радиусности сопровождается ростом  $\eta_{\sigma, cp}$ . При осадке заготовок с  $H_0/D_0 = 1,0$  при  $R/D_0 < 1,8$  более интенсивное возрастание  $\eta_{\sigma, cp}$  приходится на начальные степени деформации ( $\epsilon < 0,4$ ), а при  $R/D_0 = 1,8$  регистрируем прямо пропорциональную зависимость  $\eta_{\sigma, cp}(\epsilon)$  (см. рис. 2,а). Для  $R/D_0 > 1,8$  (см. рис. 2,а), также как и для всех отношений радиусности при осадке заготовок с  $H_0/D_0 = 2,0$  (см. рис. 2,б), более интенсивный рост величины  $\eta_{\sigma, cp}$  наблюдается для максимальных степеней деформации ( $\epsilon > 0,35$ ).

Удельную работу деформации находили, подставляя в уравнение (8) выражения (1) и (9), причем для вычисления среднего давления использовали функции (2) и (10). Зависимости удельной работы деформации медных заготовок с  $H_0/D_0 = 1,0$  и  $H_0/D_0 = 2,0$  при горячей ( $t = 850^\circ\text{C}$ ,  $\xi = 1\text{ c}^{-1}$ ) осадке выпуклыми продолговатыми плитами приведены на рис. 3.

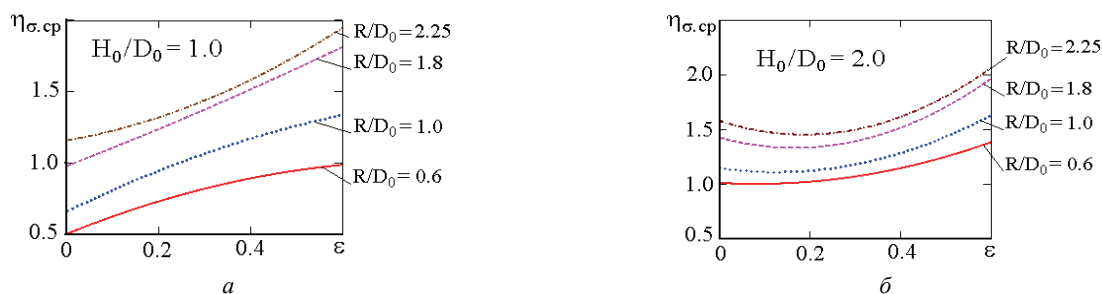


Рис. 2. Зависимости среднего приведенного давления в процессе осадки выпуклыми продолговатыми плитами при  $H_0/D_0 = 1,0$  (а) и  $H_0/D_0 = 2,0$  (б)

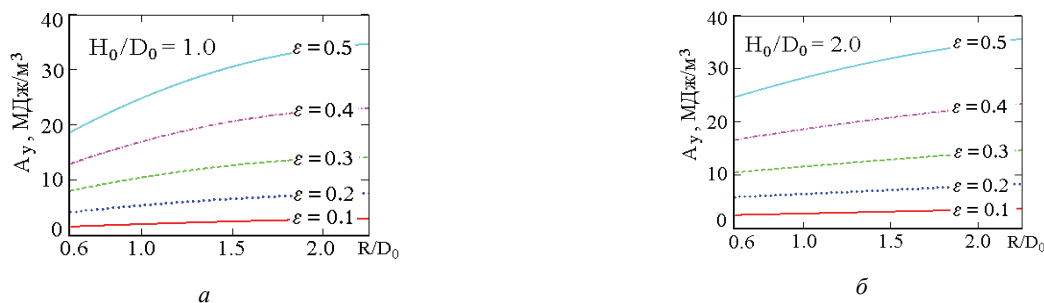


Рис. 3. Зависимости удельной работы деформации при горячей осадке медных заготовок с  $H_0/D_0 = 1,0$  (а) и  $H_0/D_0 = 2,0$  (б) выпуклыми продолговатыми плитами

Отметим общее возрастание удельной работы деформации с увеличением радиусности осадочных плит и степени деформации осадки. При этом у заготовок с  $H_0/D_0 = 1,0$  рост  $A_y$  при их осадке плитами с малой радиусностью происходит более интенсивно на максимальных степенях деформации (см. рис. 3,а), а при осадке заготовок с  $H_0/D_0 = 2,0$  наблюдается более пологий рост зависимости  $A_y(R/D_0)$  на всех значениях  $\epsilon$  (см. рис. 3,б).

Распространенной характеристикой формоизменения заготовок при подготовительном профилировании является коэффициент подкатки ( $K_{по}$ ), вычисляемый как квадрат отношения максимального и среднего диаметров профилированной заготовки, причем величина  $K_{по}$  пропорциональна работе деформации [5]. Следовательно, для поиска взаимосвязи между показателями формоизменения и энергосиловыми режимами при осадке выпуклыми продолговатыми плитами целесообразно нахождение функциональных зависимостей квадратов принятых макропоказателей (4) – (7) от величины удельной работы деформации  $A_y$ .

Графики зависимостей  $(Y_1)^2 = f(A_y)$ ,  $(Y_2)^2 = f(A_y)$ ,  $(Y_3)^2 = f(A_y)$  и  $(Y_6)^2 = f(A_y)$  приведены на рис. 4 – рис. 7. При этом плотность и порядок расположения точек на рис. 4 свидетельствует о том, что для получения определенного значения  $(Y_1)^2$  для заготовок с любым отношением  $H_0/D_0$  и практически любой радиусностью  $R/D_0$  требуется затратить приблизительно одинаковое количество удельной работы  $A_y$ . Соответственно, с достаточной степенью точности допускаем, что расчетные точки принадлежат одной функции, которая может быть аппроксимирована аналитическими выражениями. Здесь приведем наиболее простую запись:

$$(Y_1)^2 = -0,0003 \cdot (A_y)^2 + 0,0404 \cdot (A_y) + 1,0014, \quad (R_a^2 = 0,9892). \quad (12)$$

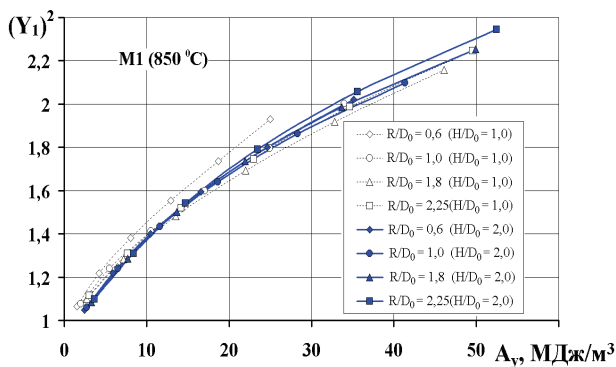


Рис. 4. Зависимость  $(Y_1)^2 = f(A_y)$  при различных значениях  $R/D_0$  для заготовок с  $H_0/D_0 = 1,0$  и  $H_0/D_0 = 2,0$

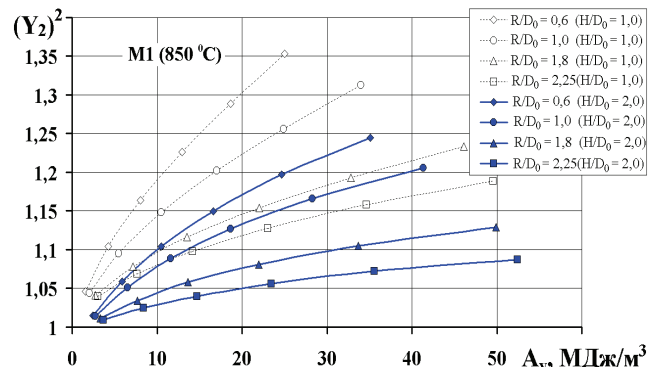


Рис. 5. Зависимость  $(Y_2)^2 = f(A_y)$  при различных значениях  $R/D_0$  для заготовок с  $H_0/D_0 = 1,0$  и  $H_0/D_0 = 2,0$

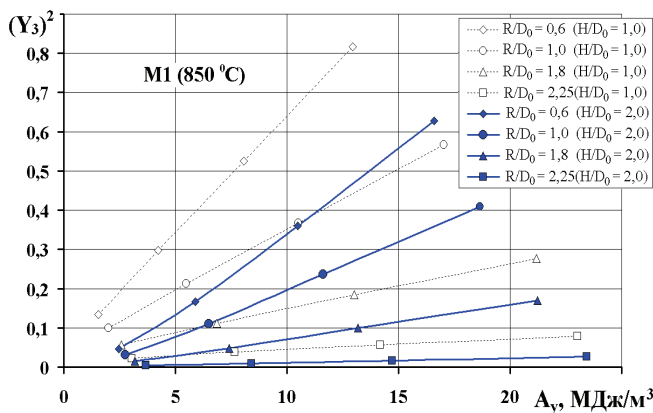


Рис. 6. Зависимость  $(Y_3)^2 = f(A_y)$  при различных значениях  $R/D_0$  для заготовок с  $H_0/D_0 = 1,0$  и  $H_0/D_0 = 2,0$

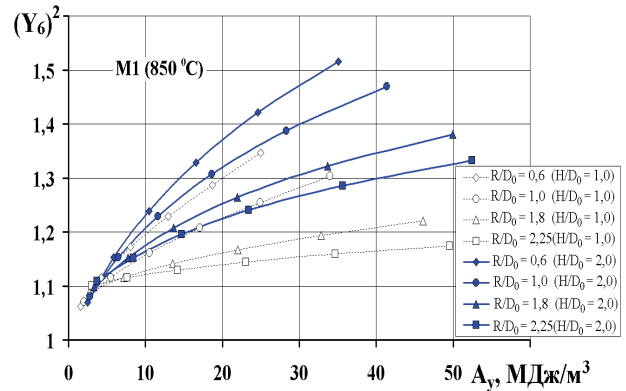


Рис. 7. Зависимость  $(Y_6)^2 = f(A_y)$  при различных значениях  $R/D_0$  для заготовок с  $H_0/D_0 = 1,0$  и  $H_0/D_0 = 2,0$

Получение определенных значений макропоказателя  $(Y_2)^2$  является более энергоемким для более высоких заготовок ( $H_0/D_0 = 2,0$ ), кроме того, затраты работы на увеличение неравномерности деформации в продольном и поперечном направлении возрастают с ростом отношения  $R/D_0$  (см. рис. 5). То есть наблюдается значимое различие удельной работы деформации, необходимой для достижения некоторой величины  $Y_2$ , зависящее от отношений  $H_0/D_0$  и  $R/D_0$ , при этом искомую функцию достаточно точно ( $R_a^2 = 0,7902$ ) описывает выражение:

$$(Y_2)^2 = [a_{21} \cdot (R/D_0)^2 + a_{22} \cdot (R/D_0) + a_{23}] \cdot (A_y)^{[b_{21} \cdot (R/D_0) + b_{22}]}, \quad (13)$$

где  $a_{21} = -0,0179 \cdot (H_0/D_0) + 0,0408$ ;  $a_{22} = 0,0759 \cdot (H_0/D_0) - 0,1447$ ;  $a_{23} = -0,0889 \cdot (H_0/D_0) + 1,1047$ ;

$$b_{21} = -0,0033 \cdot (H_0/D_0) - 0,0229; \quad b_{22} = -0,0122 \cdot (H_0/D_0) + 0,1188.$$

Для обеспечения роста высотной неравномерности деформации требуется увеличение затрат удельной работы, расходуемой на формоизменения, а максимальные значения квадрата макропоказателя  $(Y_3)^2$  реализуются при минимальной энергоемкости, которая соответствует случаю осадки заготовок с  $H_0/D_0 = 1,0$  плитами с малой радиусностью (см. рис. 6). Соответственно, достижение сравнительно малых значений  $(Y_3)^2$

при осадке заготовок с  $H_0/D_0 = 2,0$  плитами большой радиусности требует наибольших затрат  $A_y$ . Зависимость между величинами  $(Y_3)^2$  и удельной работой деформации близка к линейной со значимым влиянием  $R/D_0$  (см. рис. 6) и с достаточной степенью точности ( $R_a^2 = 0,8462$ ) может быть аппроксимирована уравнением:

$$(Y_3)^2 = [a_{31} \cdot \ln(R/D_0) + a_{32}] \cdot (A_y) + [b_{31} \cdot (R/D_0)^2 + b_{32} \cdot (R/D_0) + b_{33}], \quad (14)$$

где  $a_{31} = 0,0121 \cdot (H_0/D_0) - 0,0541$ ;  $a_{32} = -0,0102 \cdot (H_0/D_0) + 0,0459$ ;

$$b_{31} = -0,0081 \cdot (H_0/D_0) + 0,0007; \quad b_{32} = 0,0783 \cdot (H_0/D_0) - 0,0731; \quad b_{33} = -0,153 \cdot (H_0/D_0) + 0,1949.$$

Также значительной является зависимость величины  $(Y_6)^2$  от радиусности осадочных плит, причем с уменьшением отношения  $H_0/D_0$  заготовки и увеличением  $R/D_0$  плит энергоёмкость формообразования в поперечном направлении по данному макропоказателю возрастает (см. рис. 7). При одних и тех же затратах удельной работы большие значения квадрата макропоказателя  $(Y_6)^2$  соответствуют заготовкам с большей относительной высотой. Семейство кривых (см. рис. 7) хорошо ( $R_a^2 = 0,8382$ ) аппроксимирует функция:

$$(Y_6)^2 = [a_{61} \cdot (R/D_0) + a_{62}] \cdot (A_y)^{[b_{61} \cdot (R/D_0) + b_{62}]}, \quad (15)$$

где  $a_{61} = 0,0052 \cdot (H_0/D_0) + 0,0339$ ;  $a_{62} = -0,0727 \cdot (H_0/D_0) + 1,0451$ ;

$$b_{61} = -0,0007 \cdot (H_0/D_0) - 0,036; \quad b_{62} = 0,0475 \cdot (H_0/D_0) + 0,0583.$$

Таким образом, установлен характер взаимосвязи между удельной работой деформации и макропоказателями формоизменения медных (М1) заготовок в продольном, поперечном и высотном направлении при профилировании осадкой выпуклыми продолговатыми плитами.

### Выводы

В виде уравнений регрессии получены зависимости относительных макропоказателей формоизменения медных (М1) заготовок в продольном, поперечном и высотном направлении при осадке выпуклыми продолговатыми плитами, применяемой на подготовительных переходахковки и объемной штамповки. Найдены функции изменения среднего приведенного давления  $\eta_{\sigma, \text{ср}}$  и удельной работы деформации  $A_y$  от отношения  $R/D_0$  выпуклых продолговатых плит, относительной высоты заготовки  $H_0/D_0$  и степени деформации  $\epsilon$  при осадке. Установлена функциональная взаимосвязь между удельной работой деформации и принятыми макропоказателями формоизменения, что дает возможность рассчитывать затраты энергии, необходимые для достижения конечной формы заготовки при профилировании. Показано, что численное значение квадрата макропоказателя  $(Y_I)^2 = (D_3/D_0)^2$  не зависит от радиусности выпуклых плит и отношения  $H_0/D_0$  заготовки и является функцией только работы деформации. В перспективе может быть проведено сопоставление работы деформации, необходимой для достижения определенных значений макропоказателей формоизменения при подготовительной осадке выпуклыми продолговатыми плитами, с энергозатратами на операциях штамповки или эквивалентного профилирования в штампах.

**Анотація.** Запропоновані відносні критерії (макропоказники) у вигляді безрозмірних величин для оцінки геометричної формозміни заготовок при попередньому профілюванні випуклими подовженими плитами під наступне об'ємне штампування або кування. Отримав подальший розвиток метод визначення роботи деформації при об'ємній формозміні. Встановлений функціональний зв'язок макропоказників формозміни у поздовжньому, поперечному та висотному напрямках із питомою роботою деформації на прикладі профілюючого гарячого осаджування випуклими подовженими плитами мідних заготовок. При цьому отримані регресійні залежності макропоказників формозміни, що запропоновані, від геометричних та технологічних чинників. Проаналізовано зміну величини питомої роботи деформації впродовж профілюючого осаджування плитами із різним радіусом заокруглення.

**Ключові слова:** профілювання, осаджування випуклими подовженими плитами, макропоказники формозміни, робота деформації, функціональний взаємозв'язок

**Abstract.** Purpose. Purpose of researching is conclusion in carry out of mixed empirical and theoretical methodic for determination of quantity of the work of deformation during profiled upsetting by longitudinal cylindrical plates and finding the functional connection between work of form changing and relative macroindexes of the process.

Design/methodology/approach. Subject of research in article is the process of upsetting of billets by convex longitudinal (cylindrical) plates especially energy power characteristics, work of deformation, changing of macroindexes of forming. The energetic methods for determination of specific work of deformation and method of displaced volumes for finding of deformation degree are used. There approach of dependents of work of deformation and two degree of relative form changing indexes is verified in worked researches.

Findings. Functional reciprocity connection of macroindexes of the form changing in longitudinal, transverse and altitude directions with specific work of deformation was arranged to example of profiling upsetting of cooper billets by convex cylindrical plates. Regression dependents of macroindexes of the form changing of billets from geometrical and technological parameters were received before this. A changing of consequence of specific work of deformation during profiling upsetting was analyzed. One of local deduction about macroindex of broad changing confirm not depending from relative radius of cylindrical plates and quantity of relation high and diameter of billet consequently have functionally dependence from work of deformation only.

Originality/value. Results of research can use for estimation of energetic contain of technology in the design stage, for prognoses of form changing of billets during profiled upsetting and comparable of technique variants for chose of most advantageous.

**Keywords:** *profiling, upsetting by convex cylindrical plates, macroindexes of the form changing, work of deformation, functional reciprocity connection*

1. Ковка слитков на прессах / Л. Н. Соколов, Н. М. Золотухин, В. Н. Ефимов, Е. А. Мацегора, О. М. Шинкаренко; под ред. Л. Н. Соколова. – К.: Техніка, 1984. – 127 с.
2. Тарновский И. Я. Свободная ковка на прессах / И. Я. Тарновский, В. Н. Трубин, М. Г. Златкин. – М.: Машиностроение, 1967. – 328 с.
3. Пат. 44484 Україна, МПК(2009) В 21 К 1/00, В 21 J 5/00. Спосіб штампування поковок пластин / Кухар В. В., Бурко В. А., Лаврентік О. О., Дубиніна А. В.; заявник та патентовласник Приазовський держ. техн. ун-т. – № 200902832; заявл. 26.03.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. № 19.
4. Кухарь В. В. Моделирование формоизменения металла при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми продолговатыми плитами / В. В. Кухарь, С. А. Короткий, В. А. Бурко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький: ХНУ, 2008. – № 5. – С. 204–208.
5. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я. М. Охрименко. – М.: Машиностроение, 1966. – 599 с.
6. Кухарь В. В. Смещенные объемы при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми плитами / В. В. Кухарь, В. А. Бурко // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 177–182.
7. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.
8. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М.: Metallurgia, 1983. – 352 с.

## REFERENCES

1. Sokolov L.N., Zolotukhin N.M., Efimov V.N., Matsegora E.A., Shinkarenko O.M.; pod red. L.N. Sokolova. Kovka slitkov na pressakh [The forging of ingots by presses]. Kyiv, Tekhnika [Techniques], 1984. 127 p.
2. Tarnovskiy I.Ya., Trubin V.N., Zlatkin M.G. Svobodnaya kovka na pressakh [Free forging by presses]. Moscow, Mashinostroenie [Machine building], 1967. 328 p.
3. Kukhar V.V., Burko V.A., Lavrentik O.A., Dubinina A.V. Sposib shtampuvann'a pokovok plastin [A Method of die-forging of plates forging parts]. Patent Ukrainy no. 44484. 12.10.2009.
4. Kukhar V.V., Korotkiy S.A., Burko V.A. Modelirivanie formoizmenenia metalla pri osadke tsylindricheskikh zagotovok vypuklymi plitami [A simulation of form changing of metal during upsetting of cylindrical billets by convex flags]. Visnyk Khmel'nitskogo natsionalnogo universitetu [News of Khmel'nitskiy national university]. Khmel'nitskiy, KhNU, 2008, no. 5, pp. 204-208.
5. Okhrimenko Ya.M. Tekhnologia kuznechno shtampovochnogo proizvodstva [A technology of forging and die-forming industry]. Moscow, Mashinostroenie [Machine building], 1966. 599 p.
6. Kukhar V.V., Burko V.A. Smeshennyye ob'emy pri osadke tsylindricheskikh zagotovok vypuklymi plitami [A displaced volumes during upsetting cylindrical billets by convex flag]. Obrabotka materiallov davleniem [A treatment of material by pressure]. Kramatorsk, DDMA, 2008, no. 1 (19), pp. 177-182.
7. Novik F.S., Arsov Ya.B. Optimizatsia protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimenta [A optimization of processes of technology of metal by method of planning of experiences]. Moscow, Mashinostroenie [Machine building]; Sophia, Tekhnika [Technique], 1980. p. 304.
8. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. Soprotivlenie plasticheskoy deformatsii metallov i splavov: spravochnik [A resistance to plastic deformation of metals and alloys: proof-book]. Moscow, Metallurgia [Metallurgy], 1983. 352 p.